



Les origines des méthodes de modélisation dans le champs du changement climatique

Pierre Matarasso

► To cite this version:

Pierre Matarasso. Les origines des méthodes de modélisation dans le champs du changement climatique : De la Cowles Foundation aux modèles MARKAL, MERGE et DICE. Workshop Centre Alexandre Koyré ” modèles et systèmes complexes, le changement climatique global ” LaLonde Les Maures -14-20septembre 2003, Sep 2003, 2003. <halshs-00007213>

HAL Id: halshs-00007213

<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00007213>

Submitted on 14 Dec 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les origines des méthodes de modélisation dans le champs du changement climatique : De la Cowles Foundation aux modèles MARKAL, MERGE et DICE

Pierre Matarasso-CIRED

Résumé

Deux des principaux auteurs des modèles relatifs à l'effet de serre (des pionniers en la matière), William Nordhaus et Alan Manne ont fait partie du staff de la Cowles Foundation. Les premiers travaux fondant les approches économiques de la réponse à l'effet de serre font partie des « Cowles Foundation Papers » à partir de la fin des années 1970. Ce sont ces travaux qui vont aboutir aux modèles DICE, MERGE et pour partie MARKAL qui sont les modèles probablement les plus diffusés et dont l'influence a été et est encore très grande. Leur travail au moins pour Nordhaus est parti de la critique exhaustive du modèle de Forrester « World Dynamics ». Plus profondément la Cowles fut, sous l'influence de Koopmans le lieu privilégié de deux développements théoriques qui serviront de fondements aux modèles économiques de l'effet de serre :

- L'analyse d'activités (utilisée dans les modèles « bottom up » MERGE et MARKAL)
- Les modèles de croissance optimale (dont le schéma est repris dans DICE et RICE)

Il est possible en utilisant les articles de la Cowles de retracer toute l'histoire intellectuelle qui va nous conduire des premiers modèles de croissance et de gestion de ressources de l'après guerre aux conceptions contemporaines de la modélisation intégrée du changement climatique. Ce qui se joue derrière tous ces travaux, c'est la capacité de la science économique à élaborer des moyens de prendre en compte le long terme.

La plupart des textes de références qui ont servi dans le cadre de cet article sont consultables sur le site de la Cowles Foundation :

<http://cowles.econ.yale.edu/>

On les trouve dans les rubriques « CFP » (Cowles Foundation Papers) et « CFDP » (Cowles Foundation Discussion Papers). Attention !, la sélection par auteurs ne semble pas exhaustive. Autant pour Koopmans que Nordhaus, certain papiers n'apparaissent pas dans la sélection par auteur alors qu'ils figurent bien dans les CFP.

1-Préambule.

1.1-Bref historique de la Cowles Commission

Alfred Cowles (1891-1984) était un financier qui avait fondé une organisation de recherche privée orientée vers la prévision et le travail statistique. Son ambition était, des 1932, d'élever l'économie au rang d'une science précise fondée sur l'utilisation des statistiques et des mathématiques. Il fonda en 1932 la Cowles Commission avec cet objectif. La Cowles Commission résida à Colorado Springs, puis à partir de 1939 elle fut hébergée par l'université de Chicago. Enfin, en 1955 elle devint la Cowles Foundation qui s'intégra au Département de recherche Economique de l'Université de Yale.

Si la Cowles fut un des principaux laboratoires d'idées (en fait le principal entre 1945 et 1975) pour la recherche économique aux USA elle ne fut jamais une « école » au sens de l' « Ecole Autrichienne ». Il régna toujours à la Cowles un esprit ouvert et une multiplicité de courants d'intérêt. Les questions de la prévision économique et le thème de la modélisation ont toujours constitué le centre des activités de la Cowles. Cet organisme donna un grand nombre de prix Nobel à la recherche économique aux USA (Koopmans, Arrow, Debreu, Tobin, Marcowitz, Klein, Harsanyi, Simon..... ont fait partie du staff de la Cowles) (remarque il serait intéressant de placer la Cowles relativement à l'autre groupe dominant celui de l'Université de Chicago...). Deux des auteurs majeurs de modèles liés à l'effet de serre ont appartenu à la Cowles :

- Allan Manne co-auteur de MERGE et de MARKAL MACRO à fait partie du staff de 1954 à 1968,
- William Nordhaus auteur de DICE de 1967 à aujourd'hui.

Les « Cowles Foundation Papers » permettent de réaliser une étude historique de l'évolution des idées et des conceptions qui ont aboutie a plusieurs des principaux modèles de l'effet de serre.

1.2-Les grands déterminants de l'évolution vers les modèles de l'effet de serre

Un certain nombre de préoccupations se sont conjuguées pour aboutir aux modèles de l'effet de serre, chronologiquement ce sont :

- La problématique de la gestion de grands systèmes techniques résultant de l'application de la recherche opérationnelle aux opérations militaires ;
- La problématique du développement (au sens des modèles d'économies en développement) ;
- La discussion sur le thème de la croissance et de ses limites (« limits to growth ») ;
- La gestion des systèmes énergétiques et des ressources épuisables à partir de la crise de l'énergie de 1973 ;
- La question des pollutions globales et des gaz à effet de serre.

En pratique comme en théorie ces préoccupations se sont appuyées sur deux cadres théoriques distincts, « l'analyse d'activités » et les « modèles de croissance optimale » . Ces cadres possèdent cependant un point commun important, ils sont tous les deux fondés sur

le concept d'optimalité. A ce propos on pourra lire le papier synthétique de Koopmans « Concepts of optimality and their uses » (conférence Nobel 1975) :

<http://www.nobel.se/economics/laureates/1975/koopmans-lecture.pdf>

Le texte précédent témoigne de l'importance que Koopmans attribuait à ces deux formalismes, qui dans son œuvre, ont fini par accaparer toute son énergie et lui faire délaisser ses terrains initiaux de recherche, lesquels portaient davantage sur des thèmes statistiques et économétriques. Ce déplacement des centres d'intérêt de la recherche économique est également sensible pour l'ensemble de l'activité de la Cowles dans les années 50 à 90.

2-L'examen des publications de la Cowles

Nous allons procéder selon le plan suivant (qui en pratique est chronologique) :

- 1-Analyse d'activités et macro-économie
- 2-Modèles de croissance optimale
- 3-Débat sur la croissance
- 4-Modèles énergétiques
- 5-Modèle du changement climatique

Sur le plan méthodologiques il paraît ici intéressant d'introduire une hypothèse qu'il faudra vérifier. Nous avons noté que le grand courant de la modélisation des sciences exactes avait une affinité particulière avec un style « platonicien »¹ : la recherche de la permanence, de « ce qui ne change pas dans le changement ». Cette méthode s'incarne en particulier par la tentative de définir des lois (par exemple d'évolution) à partir de principes de conservation, de la recherche d'invariance, etc. Ces lois s'expriment en général sous le formes de systèmes d'équations différentielles. Avec les problèmes posés par l'économie cette conception n'est plus entièrement opératoire, il faut trouver d'autres principes de construction de modèles, en particulier pour rendre compte des grands changement structurels qui accompagnent les processus de développement. Il faut également rendre compte de ce qui gouverne l'évolution économique : le comportement des agents (et donc rendre compte des « anticipations »).

Von Neumann va lancer le mouvement d'une rénovation des méthodes de modélisation avec ses articles sur l'équilibre général, la théorie des jeux, les automates auto-reproducteurs... entre la fin des années 30 et l'immédiat après guerre. Ces modèles rompent avec la tradition des modèles « phénoménologiques » en termes d'équations différentielles². Debreu dira même que Von Neumann a « libéré l'économie de ses compromis avec les équations différentielles » (reprendre ici les termes exacts dans la « Théorie de la valeur »). Cette libération revêt plusieurs aspects :

- Introduction d'évènements et de processus discrets,
- Traitement « simultané » de phénomènes étalés dans le temps (procédure intertemporelle en économie et dans la théorie des jeux...),
- Approche mathématique fondée sur des méthodes topologiques (théorème « du point fixe » de Brouwer)

¹ Un bon exemple de l'application du style platonicien aux sciences exactes est celui de la cosmologie. On pourra lire avec profit 'Inventer l'Univers » de L. Brisson et F. Meyerstein , l'Ane d'Or, Cet ouvrage résulte de l'effort d'un philosophe et d'un astrophysicien pour mettre en avant les communautés de méthodes qui traversent la cosmologie depuis l'antiquité.

² Cette formulation est celle de Boltzmann au moment où il oppose l'atomisme à l'énergétique. Les modèles à événements discrets introduits par Von Neumann en économie sont dans la tradition de Boltzmann et en conformité avec les conceptions de l' «atomisme logique » de Russel et Wittgenstein.

Plus précisément l'article de Von Neumann sur l'équilibre général (1937) sera le point de départ à la fois de l'analyse d'activités et des modèles de croissance optimale. De plus il sera le point de départ de l'économie contemporaine pour ce qui concerne une stratégie de démonstration de l'existence et de l'unicité de l'équilibre par des techniques mathématiques dérivées de la topologie. Cette troisième innovation de Von Neumann sera largement développée dans le cadre de la Cowles par Debreu, Scarf et les théoriciens des jeux. On trouvera des exposés relatifs à ces différents points dans l'ouvrage de Dorfman, Samuelson et Solow « Linear programming and economic analysis » (Dover reprint 1986)

C'est dans le sillon tracé par Von Neumann que vont se placer les modélisateurs de la Cowles et en premier lieu Koopmans. Ce qui se joue est l'apparition d'un style nouveau de modélisation qui justement se trouve à même de répondre à des problèmes inédits dont le changement climatique est l'incarnation la plus contemporaine.

2.1-L'Analyse d'activités (1950-1963)

En 1937, pour les besoins d'un article sur l'équilibre général, Von Neumann introduit une représentation de la production dans laquelle un nombre fini de processus de production distincts, caractérisés chacun par des proportions constantes d'input et d'output, peuvent se conjuguer pour produire un ensemble de biens réclamés par l'entretien d'une population humaine. Cette représentation est fondée sur deux nomenclatures, une nomenclature de « biens » et une nomenclature « d'activités » (respectivement « commodities » et « activities » ou « processes »). Elle possède trois aspects absolument fondamentaux :

- alternatives de production (plusieurs processus pouvant produire les mêmes biens comme produit principal ou secondaire) ;
- productions jointes (chaque processus produit plusieurs biens dont éventuellement des déchets voir du capital « usé ») ;
- comptabilisation des productions en unités physiques (on définit un processus unitaire dont les consommations ou productions sont quantifiées en unités physiques).

Ces caractéristiques éloignent largement l'analyse d'activités des tableaux d'échanges interindustriels qui commencent à être élaborés par Léontieff à peu près à la même période lors de son travail au National Economic Bureau (1936) puis développé au Bureau of Labor Statistics à la fin des hostilités. Chez Léontieff, chaque « secteur » ou « branche » possède un produit unique (les matrices sont donc carrées). Par ailleurs les entrées et sorties quantifiées en valeurs représentent les échanges entre les secteurs.

Il faut souligner qu'une des propriétés essentielles de l'analyse d'activités est de permettre une représentation, non seulement des flux afférents aux opérations de production mais également des stocks d'équipements qui sont requis par ces opérations. Ce point est important, et cela autant dans les modèles d'analyse d'activités que dans les modèles de croissance optimale. La question des stocks de capital n'est pas toujours clairement traitée dans les modèles macroéconomiques, et en particulier, les matrices de Léontieff sont exprimées uniquement en terme de flux. Ce n'est que tardivement que Léontieff a introduit la question des stocks de capital (date ?). Nous verrons que Koopmans considère le formalisme de Léontieff comme un cas particulier de l'analyse d'activités.

Il faut encore ajouter que l'analyse d'activités présente une structure beaucoup plus claire (on le verra pour les questions énergétiques) que les matrices d'échanges interindustriels. En effet, pour ce qui est de ces matrices, l'état du système économique se résume à la matrice qui est dressée à un instant donné. Cette matrice représente l'état des échanges ou transferts intersectoriels à ce moment là. Lorsque l'économie évolue, les coefficients de la

matrice se transforment. Lorsque l'on cherche à mettre en place une prospective, surtout de long terme, il est en pratique extrêmement difficile de définir (par exemple par des formes fonctionnelles dépendantes du temps les coefficients de cette matrice (qui il faut le rappeler sont soumis à une contrainte de bilan équilibré).

Dans le cas de l'analyse d'activités, les coefficients des activités sont fixes, ils représentent les paramètres techniques d'une technologie de production bien définie. Ce qui varie avec le temps, c'est la proportion relative des diverses activités à l'œuvre. Ceci ne présente donc aucune ambiguïté. En pratique le changement qualitatif de la structure de la production s'exprime par l'entrée en scène progressive des activités au fur et à mesure que le progrès technique l'autorise. Dans un exercice de programmation linéaire dynamique la structure du capital est entièrement différente au début et à la fin de l'exercice³.

Au total on ne saurait donc s'étonner de ce que l'analyse d'activités s'avère mieux adaptée pour des questions de prospective de long terme. Il ne faut pas oublier que le propos de Von Neumann dans son premier article sur l'équilibre général était bien un propos de long terme, où les questions d'accumulation du capital étaient essentielles. Très généralement la question du long terme et une vision presque proche de la « science fiction » ont toujours caractérisé Von Neumann

On pourrait se demander pourquoi, si le formalisme de Léontieff n'est pas adapté au long terme, on ne rencontre pas les mêmes limitations dans les modèles de croissance optimale. Là encore la réponse est assez évidente. Le modèle de croissance optimale n'est pas un modèle qui aborde la question du « changement qualitatif » dans la mesure où un seul bien est produit, le seul changement de structure de la production dans ce cas est le changement de la composition des intrants d'une unique fonction de production. Matrices de Léontieff et analyse d'activités se préoccupent au contraire du changement qualitatif, c'est à dire des proportions des différents processus de production produisant les différents biens.

L'idée de l'analyse d'activités telle que la développe Von Neumann n'est pas absolument neuve, elle est déjà pratiquement développée dans Walras et en effet la séparation rigoureuse d'une représentation physique de la production de sa contrepartie en valeur est absolument indispensable à toute problématique d'équilibre général. Très rapidement, pour les besoins de la planification de l'effort de guerre l'analyse d'activités est redécouverte et développée par G.B Dantzig avec d'ailleurs le concours de Von Neumann. Dantzig conçoit en particulier un algorithme permettant de résoudre les systèmes d'inéquations linéaires, le simplexe qui permet de traiter de grands problèmes d'analyse d'activités. Il ne se borne pas à cela et développe l'analyse d'activités dans de nombreuses autres directions thématiques (traitements des équipements...) et algorithmiques (programmation en nombre entiers...).

Koopmans, alors directeur de la Cowles Commission perçoit tout de suite l'importance de cette méthode de représentation de la production et il assemble une monographie résultant d'un séminaire auquel vont contribuer beaucoup des économistes les plus importants aux USA : Dantzig, Koopmans, Georgescu Roegen, Samuelson, Arrow, Simon, Gale, Kunh, Tucker, Dorfman, Morgenstern...entre autres . Cette monographie : « Activity Analysis of Production and Allocation » qui porte le n°13 est publiée en 1951. L'importance de ces développements pour l'économie est confirmée par le livre « Linear programming and economic analysis » publié en 1958 par Dorfman, Samuelson et Solow. Très généralement l'analyse d'activités va s'installer alors comme la principale méthodologie de traitement des problèmes de long terme par la programmation linéaire dynamique dans un cadre « intertemporel ».

³ A ce titre l'analyse d'activités se présente comme une méthode dérivée de principes « atomistiques », le formalisme de Léontieff tire plus vers la « phénoménologie » (ce terme étant pris au sens de Boltzmann)

Au niveau de la Cowles plusieurs publications montrent comment les économistes américains percevaient ces développements. Les Cowles Foundation Papers :

- 52 « efficient allocation of ressources » par T.C. Koopmans
- 75c « activity analysis and its applications » par TC Koopmans
- 167 « comments on interindustry economics » par A. Manne

Dans le même esprit A. Manne et H. Markowitch publient la monographie Cowles 18 « Studies in process analysis : economy wide production capabilities ».

On peut résumer brièvement ce qui apparaît comme des acquis essentiels à ces auteurs :

- L'analyse d'activités est une technique de représentation de la production qui pourrait remplacer avantageusement les matrices d'échanges interindustriels de Léontieff (CFP 167 et Monograph 18) ;
- L'analyse d'activités est le cadre naturel d'un traitement mathématique de l'équilibre général, Debreu et Scarf s'en souviendront (CFP 52, 75c, Samuelson & al, et l'article de Scarf CFP 308 qui reprend l'analyse d'activités dans un cadre d'équilibre général)
- Sur le plan pratique l'analyse d'activités est adaptée au traitement de nombreuses questions d'économie sectorielle (industrielle, agricole, énergétique, gestion des ressources... CFP 52, 75)

Le premier point est celui sur lequel l'unanimité ne se fera pas. La tradition de la comptabilité nationale, la difficulté de disposer de l'information technologique disponible, la difficulté de traiter de grandes matrices et enfin l'absence d'une véritable représentation des comportements d'adoption des technologies par les agents économiques s'opposeront à l'extension macroéconomique de l'analyse d'activités. Il n'en reste pas moins vrai que les développements récents du modèle MARKAL vers une représentation intégrale de la base physique de la production semblent donner raison à A. Manne 40 ans plus tard. Par ailleurs les utilisations de l'analyse d'activités pour résoudre des problèmes sectoriels (récemment dans le domaine de la « Life Cycle Analysis »)

2.2-Les modèles de « croissance optimale »

Si la version initiale du modèle de croissance optimale vient de Ramsey (1928), sa version « moderne » vient de Koopmans, on la trouvera dans le Cowles Foundation Paper 238. Cette version est celle d'une économie où l'on produit un bien par le moyen d'une fonction de production de type Cobb Douglas utilisant du capital et du travail et où ce bien est employé soit pour augmenter le stock de capital soit pour satisfaire la consommation. Le modèle est résolu par un calcul « intertemporel » dans lequel on maximise une fonction d'utilité qui est la somme actualisée d'une fonction généralement décroissante de la consommation par tête multipliée par la population.

Le modèle de croissance optimale de Cass- Koopmans continuera de jouer un rôle majeur dans les modélisations relatives à l'effet de serre. Il constituera une des bases du modèle de Nordhaus, DICE. Par ailleurs c'est ce modèle macro-économique très simplifié qui sera par la suite connecté aux modèles sectoriels du système énergétique dans les modèles MERGE et MARKAL-MACRO. Dans cette connections, le modèle de croissance optimale assume la partie macro-économique qui pilote l'évolution de la demande énergétique finale.

Il faut souligner que l'une des vertus particulières des modèles de croissance optimale a été d'attirer l'attention des modélisateurs sur les problèmes d'accumulation du capital et de sentiers d'investissement, problèmes qui sont fondamentaux pour toute études relatives au

développement économique **de long terme**. Plus encore que les modèles d'analyse d'activités, qui dans un premier temps sont restés confinés à des modélisations sectorielles, les modèles de croissance optimale sont devenus les modèles privilégiés de la prise en compte du long terme. Et ceci en dépit de leur défaut fondamental, qui est de n'envisager que des changements quantitatifs des processus économiques, changements qui se caractérisent par les variations relatives des flux de consommation et d'investissement et celle du stock de capital productif (rien n'en ressort sur la structure productive de l'économie hormis les proportions de capital et de travail utilisées par la production).

Voir les CFP217, 238, 269, 276, 375 de Koopmans

Parmi les articles de synthèse sur la modélisation on pourra également se reporter à l'article de Shubik « simulation of socio-economic systems », 1967 CFP 267. Cet article est une bonne caractérisation des modèles selon les procédures de résolution (simulation séquentielle ou calcul intertemporel) et les descriptions du système économique (matrice I/O ou analyse d'activités). Cet article ne fait pas ses 35 ans et pose les questions en des termes toujours valables.

2.3-Le débat sur la croissance

Les années 70 voient l'émergence aux USA des premiers travaux qui critiquent la croissance comme objectif fondamental de l'activité économique. Ce mouvement de critique débutera avec les ouvrages de Paul Erlich et culminera avec les ouvrages du Club de Rome et en particulier « Limits to growth ». Nordhaus jouera un rôle de premier plan dans la contre critique au travers d'abord d'un article rédigé avec Tobin « Is growth obsolete » en 1973 (CFP 398 et 398b). Il poursuivra avec l'une des critiques les plus systématiques des modèles de Forrester et Meadows, réalisé pour le Club de Rome à partir des travaux de Forrester sur l'Analyse des systèmes au MIT. L'article de Nordhaus « World Dynamics Measurement without Data »-CFP 399 sera le premier pas de son engagement dans une recherche sur les perspectives mondiales en liaison avec le thème de l'énergie et du CO2.

L'article sur « Is growth obsolete » apparaît comme particulièrement important dans la problématique du développement durable et de la question climatique. Il introduit en effet plusieurs concepts essentiels :

- La nécessité de rendre compte des différentes formes d'investissement (domestiques et industriels) dans le cadre d'une extension dynamique des études néoclassiques de statiques comparatives (impliquées par l'idée de « développement »)
- La substitution d'un index pour la consommation par tête à un index sur la production par tête
- L'introduction de « disamenities » liée au développement économique (congestion urbaine)
- La nécessité de passer de fonctions de production à deux facteurs (capital, travail) à des fonctions de production tenant compte des facteurs de production « naturel » (terre, énergie...) dans le cas d'une croissance de la population.
- La tentative de remettre dans le champ de l'économie néoclassique le débat qui a été lancé par Erlich et le Club de Rome sur la croissance à long terme et ses conséquences en termes de pollution et de gestion des ressources
- La question des « biens publics » et des limites à la croissance pouvant résulter d'un épuisement à terme des ressources non renouvelables.

Tout ces impératifs théoriques seront plus ou moins repris dans les modèles ultérieurs de Nordhaus. Nous trouvons là une des premières tentatives véritablement cohérente de dépasser la schizophrénie antérieure où étaient juxtaposées des exercices de « statiques comparatives » développés sur le plan quantitatif par des représentations input-output et des

théories de la croissance très agrégées. L'objectif est de progresser vers ce que l'on pourrait appeler aujourd'hui une « théorie économique du développement durable » qui serait fondée non sur la recherche d'un arrêt de la croissance mais sur l'internalisation des effets à long terme des pollutions (internalisation par les prix).

L'article se poursuit en particulier par un appel à une collaboration accrue des économistes et des scientifiques des « sciences de la nature » qui sera mis en pratique par Nordhaus dans ses modèles ultérieurs. L'article s'achève par une demande appuyée de priorités de recherche sur les pollutions atmosphériques globales. **C'est la première entrée en scène du CO2 dans le champ de l'économie.**

CFP 399 « *World dynamics : measurement without data* » Nordhaus 1973

La première partie de l'article de Nordhaus retrace la réception du travail de Forrester et son succès médiatique. Pour Nordhaus, ce travail de Forrester est une version moderne de la thèse de Malthus justifiée par des méthodes « d'analyse système ». La presse le présente comme une innovation majeure et reprend les conclusions alarmistes. Le propos de Nordhaus est de réexaminer les conclusions du travail de Forrester en analysant le modèle du point de vue de l'analyse économique et en le soumettant à des tests de validité pour s'assurer qu'il correspond bien aux connaissances empiriques sur le thème de la croissance.

Il analyse dans un premier temps la structure du modèle au travers de la liste des variables et en caractérisant les différentes relations structurelles qui relient ces variables entre elles. Les thèmes suivants sont en particulier analysés :

- Croissance de la population,
- Emissions polluantes,
- Définition de la production totale,
- Définition de la production alimentaire.

De nombreuses critiques sont émises à ce stade qui rejoignent les critiques traditionnelles adressées par les économistes à Malthus :

- Pas de progrès technique,
- Pas de découverte de nouvelles ressources,
- Pas de substitution possible au niveau des matières premières .

Ces critiques pourraient se résumer à l'absence de prise en compte d'un équilibre économique et d'un marché régulateur qui entraînerait des corrections de trajectoire par augmentation des prix des ressources qui se raréfient, apparition de nouvelles techniques, prise en compte des externalités....

Mais il y a plus grave. Si certaines des relations paraissent plausibles, beaucoup ne le sont pas. Et surtout pas une seule des relations qui définissent la structure du modèle ne fait l'objet d'un test empirique. Les conclusions pessimistes de Forrester, sa confiance dans un modèle qui n'a pas été validé paraissent à Nordhaus outrecuidantes. Enfin, il assène le coup de grâce : comment se fier à un modèle « cosmique » qui agrège les êtres humains « de Fidji à Santa Barbara » ? Selon Nordhaus la théorie de l'agrégation en économie n'est possible que lorsque les micro-relations sous-jacentes sont linéaires, ce qui n'est nullement le cas pour le modèle de la World Dynamics. On peut naturellement s'interroger sur la pertinence de l'agrégation dans le modèle DICE de Nordhaus lui-même....et lui retourner la critique.

L'article de Nordhaus se poursuit par une critique systématique des différentes équations et relations sur lequel est fondé le modèle de Forrester. Il compare en particulier des extrapolations, ou rétropollations à diverses séries historiques. Il apparaît ainsi que les fonctions qui définissent la démographie paraissent ne pas avoir de sens. La population décroît avec la pauvreté et croît avec l'affluence au contraire de ce qui est observé.

Plus grave, la notion même de fonction de production, véritablement centrale en économie est absente de la problématique de Forrester. Plus généralement Nordhaus estime que les diverses formes fonctionnelles du modèle ont été spécifiées sans soin et **sans procédure de validation** sur des séries passées ce qui jette un doute sur les résultats.

La critique se poursuit par une analyse des résultats du modèle soumis à des test de sensibilité. A ce point la critique devient plus conceptuelle. A l'affirmation de Forrester, selon laquelle les méthodes « d'analyse système » pallient aux déficiences de l'esprit humain pour traiter de la complexité, Nordhaus oppose l'idée « qu'un peu d'algèbre » prouverais plutôt le contraire.

Nordhaus va plus loin et reprend le modèle de Forrester pour en déduire une version réduite qu'il va tester, en particulier pour ce qui concerne son comportement asymptotique. Ce qui force ici l'admiration, c'est que Nordhaus ne se contente pas d'une critique superficielle du modèle. Il l'évalue sur l'interprétation des équations, réalise des tests de sensibilité, construit une forme réduite pour examiner le comportement asymptotique... **Il traite le modèle comme une véritable théorie scientifique à laquelle il fait passer des épreuves.** Sa motivation est à coup sûr son antipathie pour les contempteurs de la croissance, mais il procède scientifiquement dans sa critique. Le même alliage de partialité et de rigueur scientifique se retrouvera notamment dans le modèle DICE.

Au total, se conclusion est dévastatrice :

- La « system dynamics » n'est qu'une variante des techniques de simulation employées en économie depuis longtemps...
- La représentation économique incluse dans World Dynamics est une régression par rapport aux travaux sur la croissance économique...
- Le modèle n'est en aucune manière validé...
- Il ne fait référence à aucune théorie économique reconnue...
- Le résultats du modèles sont très sensible aux valeurs des paramètres...
- La prospective de long terme est un exercice qui manque de modestie.

Il sera intéressant de voir si cette critique au scalpel ne s'applique pas au modèle DICE !

2.4-Modèles énergétiques et gestion des ressources épuisables

Plusieurs publications de Koopmans et Nordhaus se répondent dans la période qui suit la crise de l'énergie :

- CFP 396 « Some observations on 'optimal' economic growth and exhaustible resources" Koopmans 1973
- CFP 401 "The allocation of energy resources" Nordhaus 1973
- CFP 406 "Ressources as a constraint on growth" Nordhaus 1974
- CFM 26 (monographie) The efficient use of energy resources (reprise du CFP 401) Nordhaus 1979
- CFP 533 "The transition from exhaustible yo renewables or inexhaustible resources" Koopmans 1981-il s'agit là d'une des dernières publications de Koopmans.

L'article de Koopmans de 1973, « Some observation... » mérite une mention particulière. Il se situe historiquement un peu après les publications de Forrester, il est contemporain de la critique de ces dernières par Nordhaus. Il s'agit du premier article où un économiste professionnel reprend une perspective globale de long terme (comme Forrester donc) mais en cherchant à l'inscrire dans le cadre de la théorie économique. Il s'agit d'une reprise de la problématique Cass-Koopmans des modèles de croissance que l'on cherche à coupler avec une perspective de ressources épuisables et dans une large mesure de stock de pollution. Nordhaus a largement collaboré à cet article.

L'article de Nordhaus CFP 406 « Resources as a constraint on growth » est publié un an plus tard. Il traite du passage de la « cowboy economy » à la « spaceship economy ». C'est une reprise, plus littéraire, des critiques contenue dans l'article de 1973 sur le modèle de Forrester. S'y ajoute aussi une évaluation quantitative des limites qui pourraient provenir des ressources ultimes en matière d'énergie et de stock de matières premières minérales. Pour ce qui est des ressources énergétiques Nordhaus s'appuie sur l'article de 1973-CF 401 (voir plus loin). Ce qui est important ici c'est que l'article s'achève sur la constatation que les limites **ne proviendront pas des problèmes d'accessibilité et de coûts des ressources futures, mais au contraire des conséquences environnementales des usages des énergies fossiles..** L'article s'appuie sur le rapport de 1970 du MIT « Man's impact on the global environment » qui donne la question de l'effet de serre comme l'un des principaux dangers potentiels. L'étude du MIT envisage, déjà, la possibilité d'un doublement des taux de CO₂ atmosphériques. Nordhaus réalise un premier calcul, selon lui la concentration passerait de 340 ppm en 1970 à 487 en 2030, soit un accroissement de 43%. Voici ce qui pourra selon lui constituer une limites sérieuses aux activités économiques. Il vient de mettre en évidence le sujets qui l'occupera pour les 30 prochaines années.

2.5-Les articles sur l'énergie

CFP 401 « The allocation of energy resources » de Nordhaus 1973.

Cet article concerne l'étude des prix de l'énergie sur le long terme. Il s'efforce de discuter l'idée des « anti-croissance » selon laquelle les prix de l'énergie devraient beaucoup augmenter avec la nécessité de recourir à des réserves de plus en plus diluées ou de moins en moins accessibles. L'article réexamine cette question en se donnant des évaluations des ressources, un sentier raisonnable pour la demande énergétique mondiale, et des coûts d'extractions, de transports et de transformation des énergies primaires en énergie utile et en services énergétiques.. Bien entendu des hypothèses sont faites sur les technologies (par exemple que les surrégénérateurs seront au point en 2010). Enfin l'hypothèse économique principale est que le taux d'intérêt devrait rester constant dans le temps et dans l'espace à 10%.

Techniquement, l'article présente un modèle d'analyse d'activités écrit de manière assez concise. Chaque activité représente la production d'une énergie finale donnée, dans un pays donné, à partir d'une ressource énergétique primaire extraite dans ce pays ou un autre pays. Ainsi une activité rend compte des questions d'extraction, de transport et de transformation des énergies primaires en énergie finale **pour toutes les combinaisons géographiques de pays d'origine des ressources, de pays émetteur de la demande, de technologies utilisées et de période temporelle.** La chronique des technologies pour les USA entre 1970 et 2120 montre que l'approche de Nordhaus est relativement pertinente.

En simulant un marché de l'énergie dans ces conditions, les prix de l'énergie en 1970 sont proche des prix actuels. Sur les 50 prochaines années le prix des énergies finales et des services énergétiques ne devrait pas dépasser 2.2% par an. Sur 100 ans cette hausse serait

de 1.3% ans. Tout ceci ne devrait pas affecter gravement la croissance et en particulier celle de la consommation.

Honnêtement un modèle identique et désagréé aurait été plus facile à expliciter et à comprendre ! Mais cela reste un papier impressionnant. Il sera repris dans la monographie 26 « The efficient use of energy resources » qui résulte des activités de Nordhaus comme conseiller de l'administration Carter.

CFP 533 Koopmans 1981 « the transition from exhaustible to renewable or inexhaustible resources »

Cet article, l'un des derniers de Koopmans, pourrait peut-être être vu comme un testament méthodologique. Il est encore une fois dédoublé. La première partie concerne l'introduction de la question des ressources épuisables dans les modèles de croissance optimale (article de Dasgupta et Heal, question de la fusion Hotelling –Ramsey en quelque sorte). La seconde partie revient sur les modèles énergétiques. En préambule Koopmans note une fois de plus que les modèles d'analyse d'activités, les modèles en termes de processus techniques sont bien adaptés mais que la profession des économistes les reconnaît moins que les représentations de Léontieff alors que ces dernières ne sont qu'un cas particulier (production simple et pas d'alternative de production) des modèles d'analyse d'activités.

Productions jointes et alternatives d'activités sont indispensables pour représenter les systèmes énergétiques. Cela convient mieux que les méthodes input output ou les fonctions de production « continues » habituelles (la répétition de l'argument est de Koopmans...).

Trois modèles sont ensuite analysés :

- DESOM (en fait BESOM Brookhaven System Optimisation Model) un des ancêtres de MARKAL,)⁴
- ETA réalisé par A. Manne
- « Nordhaus » le modèle énergétique de Nordhaus de 1973

Il s'agit de trois modèles bottom-up en analyse d'activités dont les auteurs nous sont bien connus. Il faudrait rapprocher les arguments de Koopmans des déclarations de Simon dans Management Science de 1973 (voir la note). Elles témoignent d'une résistance de la profession des économistes, que nos deux Nobels stigmatisent, à une technique de modélisation que l'on sait parfaitement adaptée aux questions que nous pourrions qualifier aujourd'hui de « développement durable ». Malgré le développement de MARKAL, seule réponse valable a des interrogations de politique publique sur les choix technologiques dans

⁴ Ici une des première publication sur ce qui deviendra MARKAL Tessmer R.G., K.C. Hoffman, W. Marcuse, DJ. Belhing (1975) « Coupled energy system-economic models and energy planning » Computer and operation research, vol 2 p 213-224. On peut citer ce que dit Simon a propos de cette tentative dans "Technology and the environment Management Science 19 (1973) 1110-1121. « There is little point therefore, in devoting our efforts to spinning out scenarios of the sort recently made notorious by "world dynamics" or the Club of Rome report. Instead, what is needed are models that can be used to examine alternative steady states of an energy system at zillion-KWH level and other levels. One such model, and to the best of my knowledge, the only such model, has already been constructed by Kenneth Hoffman at Brookhaven (personal communication) employing a linear programming framework.. Et plus loin il ajoute "It may be a matter of surprise to you that the only energy planning model of this sort that exists today was the product of a one man self initiated effort...I am astonished and appalled. We drown in detailed statistical and predictive reports on energy in studies of innumerable special aspects of the energy problems, but we lack the elementary analytic and planning capabilities needed for sensible design of energy system; capabilities which we know perfectly well how to create.

le domaine de l'énergie, il reste une forte résistance à ces méthodes de modélisation, pas plus démodées aujourd'hui qu'à l'époque.

2.6-Les modèles du changement climatique

CFP 443-« Economic growth and climate: the carbon dioxide problem », Nordhaus 1977

C'est dans la liste des publications Cowles **le premier article de Nordhaus qui soit explicitement consacré au changement climatique exclusivement**. C'est (à ma connaissance), le premier modèle de Nordhaus consacré exclusivement à ce thème.

Pour la première fois est proposé un couplage entre un modèle de climat et un modèle économique pour déterminer des paramètres de politique publique (ici des taxes carbone) dirigées vers le contrôle de l'effet de serre. Le modèle présenté est un modèle « coût efficacité » dans la mesure où l'on cherche à déterminer le coût de la limitation des émissions sans prendre en compte les « dommages ». La partie économique du modèle est un modèle simplifié d'analyse d'activités où chaque activité consomme une ressource limitée localisée (indiquée par « j ») pour produire un bien énergétique final également localisé (indiqué par « i », comme l'activité elle-même). L'article traite d'un modèle mondial et examine au sein de ce modèle le cas des USA, la question de savoir comment la part des émissions attribuées aux USA est déterminée n'est pas explicite dans l'article.

Les conclusions de l'article sont intéressantes. Il semble que la nécessité d'agir se concentre surtout sur les périodes finales de l'exercice, vers 2020-2040. Le coût du contrôle du CO₂ est donné comme très important. Et dans ce cadre il est essentiel et de bonne décision économique de trouver des technologies de production sans émissions à cet horizon temporel. L'article s'achève sur ce que Nordhaus considère comme la question cruciale : **comment définir un régime international de contrôle qui soit accepté par des nations d'intérêts divergents**.

Taxe carbone, régime international, prospective de long terme, couplage d'un modèle d'accumulation du CO₂ et d'un modèle énergétique. Nordhaus aura posé les bases de la problématique du Changement Climatique une bonne quinzaine d'années avant les économistes des autres nations.

CFP 547-How fast should we graze the Global Commons ? Nordhaus 1982

Nordhaus après s'être attaqué à un modèle « coût-efficacité » s'applique à définir un **modèle « coût-bénéfice »**. Il construit un modèle intertemporel fondé sur la maximisation d'une fonction d'utilité dépendant de la consommation. Ce modèle comprend un cycle du carbone simplifié et une évaluation des dommages. Le sentier de croissance optimal qui mène vers un état stationnaire est celui qui répond à une condition d'égalité du coût marginal de réduction des émissions et du coût actualisé du dommage marginal résultant de l'augmentation d'une unité de CO₂. A partir de cela il définit des trajets optimaux pour différents taux de réduction.

L'article ne se borne pas à cet exercice de contrôle optimal, **il tente de poser les questions relatives à la construction d'un accord international**. En particulier il suggère que la coordination des politiques peut se réaliser de deux manières alternatives : une coordination par les prix et une coordination par les quantités. Il examine ensuite l'architecture d'un accord international fondé sur une taxe sur le CO₂. Il ne cache pas les incertitudes qui pèsent sur une telle politique : incertitudes sur les dommages et les fonctions de dommages, incertitudes sur les coûts de réduction .

CFP 579 « A review of estimates of future carbon dioxide emissions” J.H Ausubel & W. Nordhaus 1983

Cet article est essentiellement un article de synthèse qui examine des perspectives énergétiques de long terme. On y retrouve de nombreux protagonistes du débat sur l'énergie et le CO₂, l'IIASA, Edmonds & Reilly,..... Sur le plan méthodologique, l'accent est mis sur la différence entre trois types de perspectives :

- Les extrapolations tendanciennes de type « scénarios » ;
- Les études détaillées du système énergétique (en analyse d'activités) ;
- Les analyses qui mettent la question du CO₂ au centre de la prospective (par une approche de contrôle optimal).

Le texte se présente comme un rapport destiné à déclencher un soutien politique aux études sur le CO₂. Dans la section 2.2.7, peut être la plus intéressante le rapport insiste sur l'insuffisance des moyens accordés à la prospective de long terme :

- Pas de modèle économie-énergie d'envergure suffisante aux USA
- Les méthodologies relatives à l'évaluation des émissions, aux conséquences macro-économiques des politiques de réduction restent rudimentaires ;
- L'analyse des politiques publiques est encore dans l'enfance...

Tout ceci est attesté par la divergence des projections à partir des années 2000. Le constat n'est-il pas encore valable ?

CFP 758 Global warming: slowing the greenhouse express, Nordhaus 1990

Le premier d'une série de quatre articles, qui dans les années 1990-1991, vont conduire à l'article "path breaking" de Science. Il faut remarquer qu'après l'article de Science de 1991, le cycle de recherche de Nordhaus sur le Changement Climatique va se ralentir. Le modèle RICE se fera avec des contributions de Joseph Boyer et Xili Yang.

Ce texte reprend de manière absolument systématique tous les éléments de la littérature scientifique sur le changement climatique. Il examine l'état des émissions de différents gaz à effet de serre, fait le bilan des relevés de températures observées et s'enclenche sur les extrapolations pour le 21^{ème} siècle. Il réalise également une compilation des études, désormais nombreuses, sur les conséquences sociales et économiques du changement du climat, il analyse l'état des mesures préventives ou d'adaptation proposées. Présente une courbe relative aux coûts de réduction....(tirée de « Uncertainty about future climate change, estimates... » Nordhaus, Yale University, January 1990 que je n'ai pas trouvé sur les docs de la Cowles)

Le chapitre le plus neuf concerne l'examen des moyens de définir des politiques pour ralentir le Changement Climatique et sur ce chapitre fait le bilan des articles précédents de Nordhaus, en particulier sur le calcul des taxes carbone et l'approche coût-bénéfice. Il ne cache pas les complications qui se dressent devant de telles évaluations :

- La question du taux d'actualisation ;
- L'incertitude ;
- L'accroissement du risque avec l'ampleur du changement ;
- L'impossibilité de se fier à la prospective technologique.....

En matière de politique publique il propose des opérations de recherche développement, une taxe de 5\$ par tonne de carbone (un oiseau rare parmi les taxes, une de celles qui augmentent l'efficacité économique !), des accords internationaux....Mais finalement, ces propositions qui se situent lors de la transition Bush-Clinton sont énoncées du bout des

lèvres. Le danger du changement climatique paraît grand à Nordhaus....mais après l'expérience soviétique il lui semble que « l'enfer est pavé de bonnes intentions ». Et il opte finalement pour le conseil de différer la taxe, même dans le cadre d'une présidence qui aime bien les taxes.

CFP 775 « The cost of slowing climate change, a survey »-Nordhaus 1991

Cet article illustre bien le "style" de Nordhaus, celui par lequel il s'efforce de se distinguer, par exemple de Forrester. Lorsqu'il s'agit de traiter un sujet aussi épineux que le coût des réductions de CO₂, il tente de rechercher une évaluation qui soit étayée aussi bien par des approches techniques que par des approches économétriques. Et dans cet esprit, il va réaliser une synthèse soignée de toutes les études disponibles sur le sujet. Il est parfaitement conscient que ce paramétrage technique, de même que celui des dommages qu'il examinera dans une autre publication constitue le cœur du modèle de l'effet de serre qu'il se propose de construire. Aussi l'article s'efforce-t-il d'être clair et méthodique et de plus compréhensible par des économistes ou des décideurs qui ne seraient pas des spécialistes du sujet.

L'article débute par l'observation essentielle qu'il existe non pas un seul, mais plusieurs gaz à effet de serre : CO₂, Méthane, CFC 11 et 12, oxyde nitreux... Ensuite il aborde la question des coûts de réduction sous l'angle théorique et méthodologique. Il faut distinguer le coût total, le coût marginal et enfin le coût moyen. Tous ces coûts sont croissants avec le taux de réduction. Il semble que pour des taux faibles de réduction il y ait même des coûts nuls (voir négatifs-on améliore la productivité du procédé émetteur).

Pour tracer une courbe de ces coûts en fonction du taux de réduction il est possible d'utiliser trois sources :

- Des sources purement technologiques ;
- Des sources économétriques et des études d'élasticité ;
- Des sources provenant de modèles technologiques en analyse d'activités.

Des courbes empiriques de coûts marginaux et de coûts totaux sont ainsi dressées pour le CO₂. L'exercice est repris pour les CFC. A cela s'ajoute une étude de la séquestration du CO₂ par plantation de forêts et enfin une étude sur les possibilités de geo-engineering, c'est à dire des possibilités de captation à grande échelle du CO₂ par fertilisation océanique, de création d'écran de particule stratosphérique.... De tout cela est déduit une courbe synthétique de coût marginal et total.

CFP 791—« To slow or not to slow : the economics of the greenhouse effect »-Nordhaus 1991

Cet article de « l'Energy Journal » se veut un article fondateur de l'analyse du changement climatique sur le plan de la théorie économique. L'article commence par une exposition thématique du problème de la décision économique face au changement global. Il se prolonge par la présentation d'un modèle analytique simplifié qui constitue l'ébauche de celui qui sera présenté dans l'article de Science, peu après. Le résumé de l'approche est à peu près celui-ci :

« La question fondamentale de politique publique concernant l'effet de serre est de savoir combien la société va consentir de pertes de consommation aujourd'hui par la réduction de émissions pour éviter des dommages résultant du changement climatique dans le futur ».

Pour répondre à cette question il faut se fonder sur deux estimations :

- Celle des coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- Celle de l'importance des dommages économiques résultant du changement climatique.

Ces deux chroniques de coûts font l'objet d'estimations à partir de la connaissance empirique accumulée depuis quelques années. Pour réaliser une étude qui embrasse tout l'horizon temporel du programme, il faut également se fixer un taux d'actualisation.

Le chapitre 7 de l'article compare donc ensuite le coût total de réduction annuel et les bénéfices résultant de la réduction (en dommages évités) pour des taux de réduction croissants. Il apparaît que le coût de réduction croît beaucoup plus vite que les bénéfices de la réduction. **Le taux de réduction optimal serait de 11%**. La conclusion reprend ces éléments, en faisant les réserves d'usage sur l'incertitude.

Il serait à ce stade intéressant de reprendre la critique de Nordhaus du modèle de Forrester, pour examiner dans quelles mesures, Nordhaus ne tombe pas lui même sous le sceau de la critique qu'il a formulé plus de quinze ans avant. Plusieurs questions particulièrement épineuses ne sont pas abordées dans cet article de synthèse. La première est que la question de la réduction ne fait jamais l'objet d'une décomposition entre ce qui pourrait-être ses différents éléments. Réduire les émissions résulte de quatre types d'actions bien distinctes :

- Modérer les consommations de services énergétiques finaux (« frugalité énergétique »)
- Améliorer les rendements de la production des services énergétiques finaux (passage des véhicules individuels aux transports en commun, isolation des maisons, lampes basse consommation...)
- Produire des énergies primaires sans émissions (nucléaire, renouvelables...)
- Séquestrer du carbone par des moyen bio-physiques (forêts...)

Nordhaus en bon économiste US envisage principalement les deux derniers types de mesures. La question des conséquences macro-économiques des mesures de réduction est également absente. Sur le versant des dommages, la question de l'altération irréversible du climat terrestre est vue pour dire le moins, de façon « optimiste »

CFP 829-“An optimal transition path for controlling greenhouse gases » Nordhaus 1992

C'est l'article de Science qui présente le modèle DICE. Ce modèle reprend à peu près toute la perspective tracée par la publication précédente. Le changement le plus important est que le modèle est cette fois exprimé pour être résolu comme un modèle intertemporel dans le cadre du logiciel GAMS. **Un nouveau paradigme de l'analyse coût-bénéfice d'un problème environnemental global est né : le modèle DICE**

Le modèle DICE est un modèle qui décrit l'économie mondiale dans son interaction avec le système climatique représenté sous une forme simplifiée. Il est dérivé d'un type de modèle classique en économie, le modèle de croissance optimale (modèle de Ramsey). DICE est un modèle en temps discret dans lequel on définit à chaque période « T » deux grands groupes d'équations :

- les équations « intra périodiques » qui relient les variables contemporaines ;
- les équations inter périodiques qui sont de classiques équations d'évolutions.

La structure du système d'équations peut être sommairement résumée de la façon suivante :

Les équations « intrapériodiques »

- Définition de la production à partir du stock de capital mondial et de la population mondiale, cette production est pondérée par une fonction qui rend compte des dommages dus au changement climatique lesquels dépendent de la température moyenne du globe ; elle est pondérée également des coûts des réductions d'émissions de gaz à effet de serre réalisées à chaque période ; enfin un terme rend compte d'un progrès technique exogène ;
- Equilibre économique, la production à chaque période est égale à la consommation mondiale plus l'investissement ;
- Définition des émissions de CO₂ à partir de la production mondiale.

Les équations interpériodiques

- Evolution du stock de capital à partir du stock de capital et de l'investissement à la période précédente en tenant compte de la dépréciation du capital ;
- Evolution du stock de CO₂ atmosphérique à partir du stock de CO₂ et des émissions à la période précédente ;
- Evolution de la température à partir du stock de CO₂ atmosphérique à l'année courante et de la température de l'année précédente (modèle de climat simplifié).

Les équations et fonctions « exogènes »

- Evolution de la population mondiale ;
- Fonction définissant les coûts des réductions d'émissions à partir de leur niveau (par calage économétrique) ;
- Evolution du progrès technique, intensité en énergie et en carbone de la production ;
- Fonction de dommages liés à la température moyenne.

Cet ensemble d'équations est « sous déterminé », c'est à dire que l'évolution du système dépend de deux variables de contrôle :

- La première variable de contrôle est classique aux modèles de croissance optimale, elle a trait au partage de la production entre la consommation et l'investissement ;
- La seconde variable de contrôle et ici la plus fondamentale est le niveau de réduction des émissions à chaque période

L'une des originalités introduite par W. Nordhaus a été de passer de la conception classique d'un modèle de simulation séquentiel (calculé dans un temps homothétique du temps réel) à un modèle de contrôle optimal. Au lieu de devoir faire fonctionner la simulation à partir de scénarios exogènes définissant à chaque période les réductions d'émissions et la consommation mondiale, on va chercher à déterminer des valeurs optimales de ces

variables par un calcul « intertemporel ». C'est à dire que l'on va écrire un système d'équations qui est constitué en déclinant les équations précédentes pour l'ensemble des périodes concernées depuis la période initiale jusqu'à l'horizon temporel final. On va résoudre globalement (comme un système d'équations simultanées) ce système d'équations en ajoutant des conditions initiales et si nécessaire des contraintes finales (portant par exemple sur la température finale, sa stabilisation.....) en optimisant une fonction d'utilité sociale qui est une somme actualisée d'une fonction de la consommation par tête.

Grâce à cette structure, DICE s'est affranchi des défauts qui avaient été diagnostiqués sur le modèle initial du Club de Rome. DICE est un modèle économique rigoureux conforme aux modèles de croissance optimale. Il incorpore du progrès technique et enfin il ne risque pas de manquer sa cible comme cela est classique pour les modèles de simulation (c'est « l'overshoot and collapse » du modèle de Club de Rome). On peut en effet dans ce cadre inter-temporel fixer, si nécessaire, comme contraintes des conditions finales impliquant une stabilisation de la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre à un certain niveau.

Bibliographie Internet

Toutes les sources de cet article sont disponibles sur le site de la Cowles Foundation :

<http://cowles.econ.yale.edu/>

Il suffit d'aller chercher le CFP (Cowles Foundation Paper) portant le n° de référence donné dans l'article.